

МОНИТОРИНГ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НА ОСНОВЕ ИИС БЛОЧНО-МОДУЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ

И.В. Белицын

В статье рассматриваются вопросы контроля, мониторинга и оценки параметров магнитной составляющей электромагнитного поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи. Приводится анализ возможности и целесообразности использования различных первичных преобразователей и фильтров в разработанной информационно-измерительной системе. Предложена и обоснована блок-схема измерительного устройства, а также его электрическая схема.

Ключевые слова: магнитное поле, электроустановка, информационно – измерительная система, первичный преобразователь, датчик Холла, электрическая схема.

В настоящее время большое значение придается вопросам электромагнитной совместимости (ЭМС), кроме этого одним из факторов воздействующим на окружающую среду и человека является электромагнитное загрязнение [1], создаваемое высоковольтными установками. Поэтому актуальной задачей является мониторинг электромагнитного поля, а для этого необходимы технические средства измерений. Рассмотренные в [2] приборы предназначаются для измерения параметров ЭМП только в одной точке, кроме этого, большинство из этих приборов не может быть удалено от места измерений. Поэтому оценка параметров ЭМП и, в частности, электрического и магнитного поля МП, эксплуатируемых объектов электроэнергетики, не могут быть рационально реализованы с помощью указанных приборов.

Исследования, проведенные в России и за ее пределами [3 - 5] показали, что магнитное поле является фактором, влияющим на работу различных систем и органов человека, например, сердечнососудистую, нервную, эндокринную и т.д. Промышленными источниками сильного магнитного поля являются объекты энергетики, в частности воздушные линии электропередач, электрооборудования станций и подстанций. Если на станциях и подстанциях в зоне влияния магнитного поля находится специализированный персонал, то вблизи воздушных линий электропередач в зоне влияния могут находиться, а иногда даже и постоянно проживать, люди не связанные с эксплуатацией, обслуживанием и ремонтом энергетических объектов.

Требуются измерения различных физических величин, таких как температура,

влажность, напряженность электрического и магнитного поля, в большом числе точек за ограниченный интервал времени. При этом результаты измерений должны быть сосредоточены в одном центре. Очевидно, что даже простое наблюдение и регистрация показаний измерительных приборов выходит за возможности оператора, не говоря уже об обработке результатов измерений с целью сделать требуемые выводы и заключения.

Для решения этой задачи возможно и целесообразно применить измерительные устройства, получившие названия информационно-измерительных систем (ИИС). В ИИС измерительную информацию о физических величинах в большом числе точек с первичных измерительных преобразователей по каналам связи поступает в централизованное автоматическое устройство, которое по определенной программе обрабатывает и хранит первичную измерительную информацию и выдает в удобной форме комплексные данные.

Исходными данными для проектирования ИИС являлись напряжение питания 5В (USB), число точек (узлов) измерения – 1000, количество каналов с одной точки измерения – 3, основная гармоника промышленной частоты – 50 Гц, ослабление сигнала за полосой 40-60 Гц > 10db, напряжение входного сигнала – 0.005 В – 10В, источник питания пассивных датчиков - ±5В.

ИИС выполнена на основе аналого-цифрового преобразователя (АЦП) **ZET 210** предназначенного для измерений параметров сигналов с 16 входов в широком частотном диапазоне (с частотой дискретизации до 400 кГц), поступающих с различных первич-

МОНИТОРИНГ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НА ОСНОВЕ ИИС БЛОЧНО-МОДУЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ

ных преобразователей. Подключение модуля **ZET 210** к ПЭВМ осуществляется по шине USB 2.0, по ней же происходит питание модуля.

При использовании флэш-накопителя модуль **ZET 210** может использоваться в режиме автономного регистратора при этом сценарий записи (каналы, частота дискретизации, режим записи и т.д.) задается с компьютера с помощью поставляемого в комплекте программным обеспечением. В автономном режиме питание осуществляется от блока аккумуляторов или преобразователя 220 В→5 В. Для последующей обработки анализа записанных временных данных модуль АЦП подключается к ПК по шине USB 2.0 и воспроизводит сигналы из файлов.

Расширение числа входов АЦП Zet210 реализуется за счет использования аналоговых мультиплексоров (MUX), имеющих один или более управляющих входов и один выход. Мультиплексор позволяет передать сигнал с одного из входов на выход, при этом выбор желаемого входа осуществляется подачей соответствующей комбинации управляющих сигналов, и электрически соединяет выбранный вход с выходом.

MUX в общем случае можно представить в виде коммутатора, управляемого входной логической схемой. В качестве этой схемы используется сам модуль Zet210.

Входные аналоговые сигналы S_i поступают на входы коммутатора и через коммутатор передаются на выход D. Управление коммутатором осуществляется входной логической схемой. В цифровых мультиплексорах логические элементы коммутатора и дешифратора обычно объединяются. На вход логической схемы подаются адресные сигналы A_k . Мультиплексоры могут иметь дополнительный управляющий вход E, который может разрешать или запрещать прохождение входного сигнала на выход D.

В качестве электронного выбран 16-канальный аналоговый мультиплексор/демультиплексор типа ADG406 (16-channel analog multiplexer/demultiplexer). Его структурная схема представлена на рисунке 1.

Управление коммутатором осуществляется входной логической схемой по 4 каналам. Выбор необходимого канала осуществляется подачей на вход логической схемы необходимой последовательности сигналов, например для подключения третьего входа необходимо падасть сигнал на A1 и EN.

Для расширения числа входов до 4096 штук реализуется алгоритм аппаратного

умножения, который заключается в каскадном включении мультиплексоров и представляет собой последовательное подключение к выходу одного последующего мультиплексора. Таким образом, используя шестнадцативходовый мультиплексор, двухуровневое включение позволяет расширить число входов до $16 \times 16 = 256$. Подключив такие сегменты (далее - матрицы) к 16 входам АЦП, количество входов расширяется до 4096 (рисунок 2).

Входы сгруппированы в 16 матрицы по 256 входов. Каждая матрица содержит 16 модулей. Каждый модуль содержит 16 входов. Таким образом, количество входов рассчитывается как $(16 \text{ матриц}) \times \{(16 \text{ модулей}) \times (16 \text{ входов})\} = \text{всего } 4096 \text{ входов}$

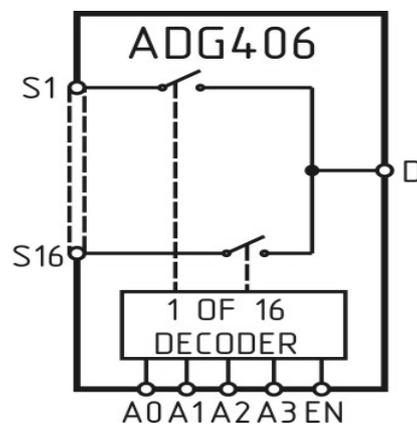


Рисунок 1 - Структурная схема ADG406

Каждый вход имеет свой адрес, например первый вход, будет находиться в первой матрице в первом модуле и иметь адрес 1-1-1, а 4096 вход находится в 16^й матрице в 16 модуле и имеет адрес 16-16-16.

На входы всех коммутаторов первого уровня подается одна общая группа сигналов (селектор модуля), определяющая подключенный модуль. На входы всех коммутаторов второго уровня подается другая группа сигналов (селектор входа), определяющая подключенный вход.

Например, если через селектор модуля подается сигнал на вход $A3=0$, на вход $A2=1$, на вход $A1=0$, на вход $A0=0$, то во всех матрицах подключается пятый модуль. Аналогично и для подключения входа. Таким образом, к каждому входу АЦП подключается группа входов, определенная номером модуля и номером входа в этом модуле.

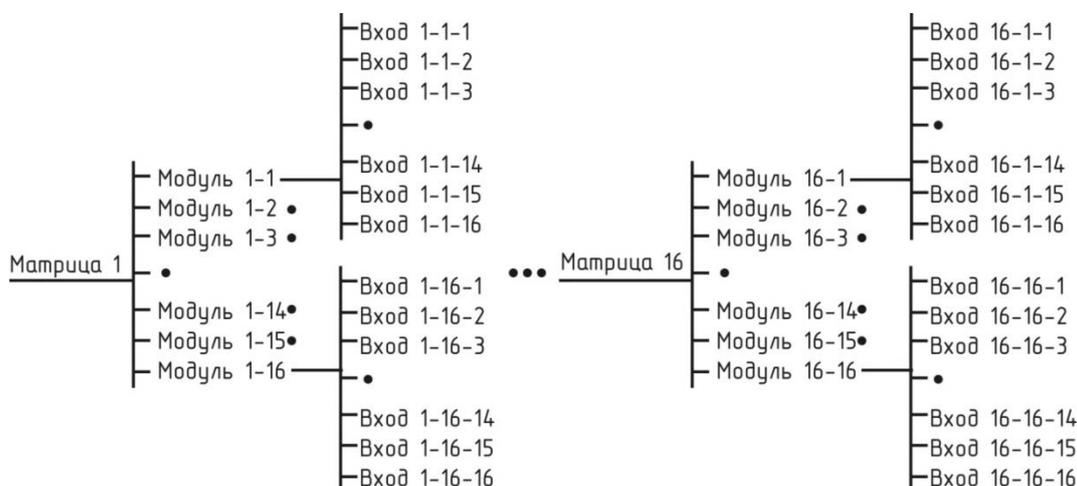


Рисунок 2 - Организация матриц входов

Первичный преобразователь.

В современной измерительной технике используются несколько физических принципов и различные способы измерения магнитного поля. Все они обладают теми или иными достоинствами и недостатками в условиях различных задач и условий измерения. Рассмотрим существующие виды первичных преобразователей применительно к нашей задаче.

В определим возможность и целесообразность применения магнитомеханических преобразователей. Магнитомеханические преобразователи, применяемые совместно с оптическим способом отсчета и регистрации, обладают довольно высокой точностью, но такой способ регистрации затруднителен для преобразования его в цифровой сигнал, с целью его фиксации и анализа на ЭВМ. Наиболее важным для вопроса применения магнитомеханических преобразователей является то, что элементы таких преобразователей обладают большой инерционностью, и частотный диапазон измеряемых полей ограничен значениями порядка единиц герц. В промышленных же условиях важную роль играют составляющие магнитного поля промышленной частоты.

Датчики напряженности магнитного поля (или его составляющих) делятся на индукционные, магнитомодуляционные, квантовые и сверхпроводниковые

Магнитометры, основанные на явлении ядерного магнитного резонанса, являются на сегодняшний день самыми точными. Основными недостатками квантовых методов измерения магнитного поля является большая

длительность измерений (до нескольких минут) и сложность конструкции. Высокая точность и чувствительность квантовых методов позволяет использовать приборы в качестве эталонных, но высокая стоимость, ограниченный диапазон измеряемых индукций ограничивают область их применения.

Индукционные преобразователи представляют собой катушку или систему катушек, определенным образом расположенных друг относительно друга. Основными недостатками пассивных индукционных преобразователей является прямая зависимость выходного сигнала от частоты, потеря информации о постоянной составляющей измеряемой величины и дополнительные погрешности при измерении несинусоидальной индукции, также стоит отметить, что индукционные преобразователи вносят искажения в измеряемое поле.

Первичные преобразователи на основе эффекта Холла получили широкое распространение благодаря ряду своих особенностей. Во-первых, датчик Холла в принципе является статическим элементом, что при измерении магнитной индукции дает ему преимущества перед измерениями, проводимыми посредством баллистических или индукционных преобразователей. Датчик Холла представляет собой направленный элемент, поскольку выходное напряжение пропорционально нормальной составляющей вектора магнитной индукции, поэтому, используя систему из трех датчиков, можно определить не только значение вектора магнитной индукции, но и его ориентацию в пространстве. Возникновение напряжения Холла является мало-

МОНИТОРИНГ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НА ОСНОВЕ ИИС БЛОЧНО-МОДУЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ

инерционным процессом. Обладают простой линейной зависимостью выходного напряжения от двух входных величин. Дают возможность применения управляющих полей и токов постоянных, переменных или импульсных для получения соответствующих напряжения и тока на выходе, что позволяет детектировать, модулировать и затем получать на выходе сигналы соответствующей формы и мощности. Позволяют снимать напряжение Холла как непосредственно, так и после предварительного усиления. Обладают относительно простой и маломощной схемой питания. Имеют малые габариты и массу, что немаловажно для проведения измерений в полевых условиях, а также для размещения их внутри зданий и сооружений. Датчик Холла мало искажает исследуемое магнитное поле, поскольку управляющий ток и ток полезного сигнала довольно малы. Кроме всего прочего имеют относительно невысокую стоимость и высокую надежность. Выходная величина датчиков Холла – электрическая, что немаловажно для организации измерений, обработки и передачи информации посредством ЭВМ.

Таким образом, проанализировав существующие методы измерения магнитных полей, можно прийти к выводу, что наиболее приемлемым первичным преобразователем для данной задачи, являются датчики Холла. В силу того, что они обладают малыми габаритами, массой, высокой надежностью, позволяют применять различные схемы питания, задавать параметры выходного сигнала их применение является наиболее обоснованным [3, 4].

В качестве первичного преобразователя был выбран датчик на эффекте Холла компании Honeywell с линейным выходом SS495A2. Он состоит из полупроводникового элемента Холла, стабилизатора питания, дифференциального усилителя и выходного каскада. Выходное напряжение этого датчика находится в линейной зависимости от величины вектора магнитной индукции и за пределами рабочей области датчик входит в насыщение. При отсутствии внешнего магнитного поля напряжение на выходе равно половине напряжения питания. Размах выходного напряжения и чувствительность датчиков находятся также в линейной зависимости от напряжения источника питания (пропорциональный выход). Этот тип датчиков характеризуется высокой нагрузочной способностью, линейной характеристикой преобразования в рабочем диапазоне магнитных полей, широким

диапазоном рабочих температур и питающих напряжений, долговременной стабильностью параметров и малым током потребления.

Для питания первичного преобразователя используется источник опорного напряжения, в результате выходной сигнал был с гораздо меньшим количеством искажений.

Исследования проведенные, как с помощью математических моделей, так и с помощью натуральных экспериментов значения напряженности магнитного поля вблизи поверхности земли лежат обычно в диапазоне от 0,01 до 40 А/м, что соответствует 0,00013- 0,5 Гс. Таким образом, для надежной регистрации сигнала необходим предварительный усилитель с коэффициентом усиления 1000. В этом случае при использовании датчика SS495A с характеристикой приведенной на рисунке 3 мы сможем измерять напряженность магнитного поля в диапазоне 0,025 - 51 А/м с дискретностью не более 0,03 А/м.

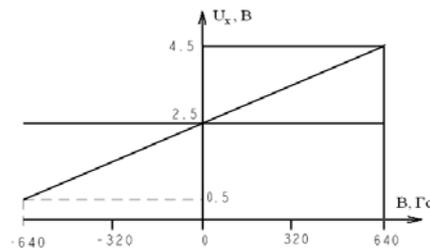


Рисунок 3 – Зависимость напряжения Холла от индукции магнитного поля при напряжении питания 5 В

На рисунке 4 представлена блок схема устройства для одной точки измерения.

Усилитель. Поскольку напряжение сигнала с датчиков изменяется в широких пределах, необходимо использовать усилитель с регулируемым коэффициентом усиления [6]. Усилитель должен обеспечивать высокое входное сопротивление для работы с различными датчиками. При использовании дифференциальных датчиков, усилитель должен обеспечивать высокую степень подавления синфазного сигнала.

Данным требованиям соответствует инструментальный усилитель, предназначенный для задач, требующих прецизионного усиления с высокой точностью передачи сигнала.

Инструментальный усилитель относится к классу операционных усилителей с одним принципиальным отличием, связанным с работой исключительно с замкнутыми линейными цепями обратных связей.

БЕЛИЦЫН И.В.



Рисунок 4 - Блок схема устройства для измерения в одной точке

Поэтому в инструментальных усилителях отсутствует в качестве контролируемого параметра коэффициент усиления с разомкнутой обратной связью. Вместо этого вводятся параметры точности и нелинейности передачи сигналов при выбранных фиксированных значениях коэффициентов усиления по напряжению, обычно, 1, 10, 100, 1000.

Измерительный усилитель представляет собой двухкаскадный усилитель. Первый каскад — дифференциальный усилитель на двух взаимосвязанных неинвертирующих усилителях. Для повышения входного сопротивления входной каскад строят на двух отдельных (независимых) неинвертирующих усилителях. Второй каскад — дифференциальный инвертирующий усилитель. Буферные взаимосвязанные неинвертирующие усилители увеличивают входное сопротивление (импеданс) низкоимпедансного, дифференциального, инвертирующего усилителя.

Модернизацией классической схемы ИУ, является схема AD623 (рисунок 5) фирмы ANALOG DEVICES. Микросхема AD623 представляет из себя микромощный инструментальный усилитель общего применения. Гибкая структура из трех операционных усилителей и малый размер делают его идеальным для множества применений. Входная цепь с обратной связью по току обеспечивает широкую полосу пропускания даже при высоком коэффициенте усиления (70 кГц при $K_U = 100$). На три внешних резистора устанавливаются один из коэффициентов усиления 1, 10, 100. Внутренние цепи защиты входного каскада выдерживают напряжение до ± 40 В без повреждения прибора. Лазерная подгонка обеспечивает очень низкое напряжение смещения (50 мкВ), малый дрейф (0,5 мкВ/°С) и высокий коэффициент подавления синфазных входных сигналов (110 дБ при $K_U = 1000$).

60

Она наилучшим образом подходит для проектируемой измерительной системы, для усиления малых сигналов на фоне высоких синфазных помех.

Фильтр. Для получения необходимой характеристики сигналов от датчиков необходимо использование полосового фильтра, который может быть пассивным или активным [7, 8].

В качестве пассивных фильтров широко применяются LC-фильтры, т.е. цепи, содержащие реактивности разных знаков. Благодаря резонансным явлениям в таких цепях выделяются колебания, находящиеся в полосе пропускания.

Однако, вместо значительных затрат средств на совершенствование теории, технологии и изготовления LC-фильтров, расширяется тенденция по исключению последних из современной электронной аппаратуры, поскольку интегральные схемы полностью изменили обычные системы и критерии, принятые раньше в разработках. В качестве активного прибора неизменно используется операционный усилитель благодаря своим исключительным свойствам и приемлемой стоимости. Термин «активные фильтры» включает множество различных построений схем и методов проектирования, важнейшие из которых можно сгруппировать в следующие три категории:

Каскадное проектирование фильтров. Здесь подразумеваются изолированные звенья фильтров второго, соединяемые каскадно для реализации требуемых передаточных функций более высокого порядка.

Имитация LC-фильтров. Исходной позицией является структура LC-фильтра. Далее она реализуется либо имитацией каждой индуктивности гираторно-конденсаторной цепью, либо преобразованием первоначальной схемы фильтра.

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК №2/2 2011

МОНИТОРИНГ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НА ОСНОВЕ ИИС БЛОЧНО-МОДУЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ

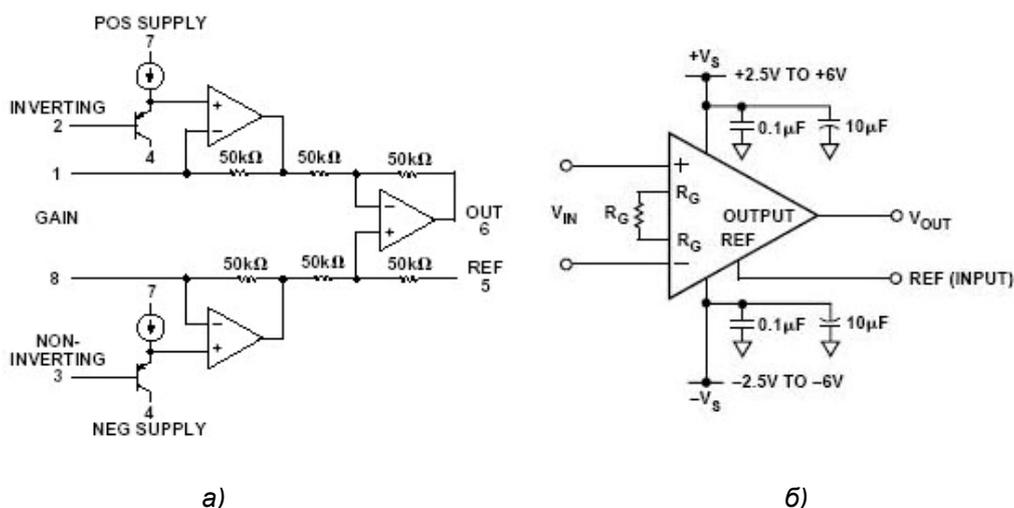


Рисунок 5 - Инструментальный усилитель AD623, а) принципиальная схема, б) условное обозначение

Связанные фильтры. В общем случае здесь исходной точкой является каскадное соединение активных фильтров первого и второго порядков (предпочтительно функциональных узлов общего назначения), которые затем охватываются дополнительными петлями отрицательной обратной связи. Последние вводятся для обеспечения в результирующей каскадной структуре активного фильтра той же стабильности, которая достигается в имитируемой схеме LC-фильтра.

Схемы активных фильтров. Фильтр на источнике напряжения, управляемом напряжением (ИНУН). В фильтрах на ИНУН используется минимальное число элементов (один операционный усилитель на два полюса характеристики), при этом они дают дополнительный выигрыш в виде не инвертирующего коэффициента усиления, низкого выходного полного сопротивления, малого разброса значений параметров, простоты регулировки коэффициента усиления и способности работать при большом коэффициенте усиления или высокой добротности.

Фильтры, построенные на основе метода переменных состояния. Изображенный на рисунке 6 двухполюсный фильтр куда более сложен по сравнению с фильтрами на ИНУН, но он широко применяется благодаря повышенной устойчивости и легкости регулировки. Кроме того, частоту фильтра можно регулировать при неизменном значении добротности Q (или неизменной полосе пропускания - по выбору) характеристики в полосе пропускания. Как при работе с фильтрами на ИНУН, несколько секций могут быть соединены каскадно для создания фильтров более высоких

порядков.

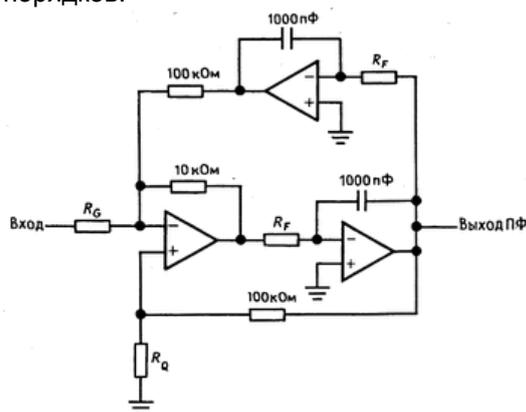


Рисунок 6 - Фильтр, построенный на основе метода переменных состояния

Наиболее близко к фильтру на основе метода переменных состояния примыкает так называемый биквадратный фильтр. В этой схеме также используются три ОУ.

Для выбора схемы фильтра будем опираться на следующие условия: минимальное число пассивных элементов; минимальная чувствительность передаточных характеристик к изменению пассивных элементов; простые настройка и способы производства; минимальный разброс номиналов элементов, в частности при использовании гибридно-интегральных (например, тонкопленочных) пассивных элементов.

За основу фильтра возьмем схему, построенную на основе метода переменных состояния. Расчет схемы по исходным данным производим в программе Filter Wiz Pro. Рассчитанная схема фильтра представлена на рисунке 7.

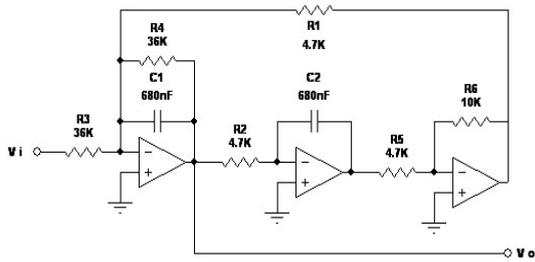
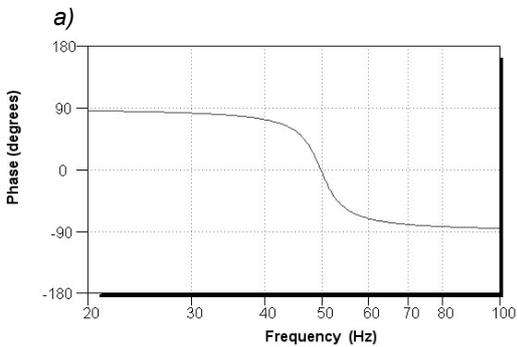
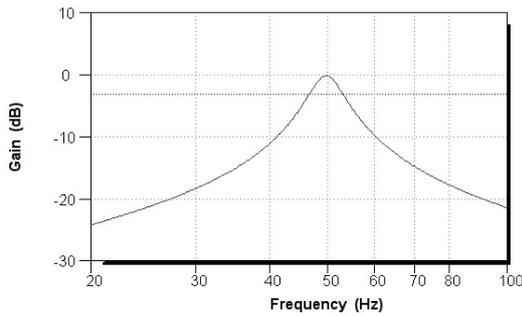


Рисунок 7 - Расчетная схема фильтра

Амплитудо–частотная и фазо-частотная характеристики показаны на рисунке 8.



б)

Рисунок 8 - Характеристики фильтра
а) амплитудо–частотная характеристика,
б) фазо-частотная характеристика

Следовательно, рассмотренные схемы инструментального усилителя и фильтра удовлетворяют требованиям проектируемой ИИС. Электрическая схема усилителя и фильтра для трех первичных преобразователей, расположенных в трех взаимноперпендикулярных плоскостях и в одной точке измерения, приведена на рисунке 9.

Для тестирования фильтра использовалось магнитное поле, создаваемое соленоидом и регулируемое с помощью изменения протекающего по нему тока.

дом и регулируемое с помощью изменения протекающего по нему тока.

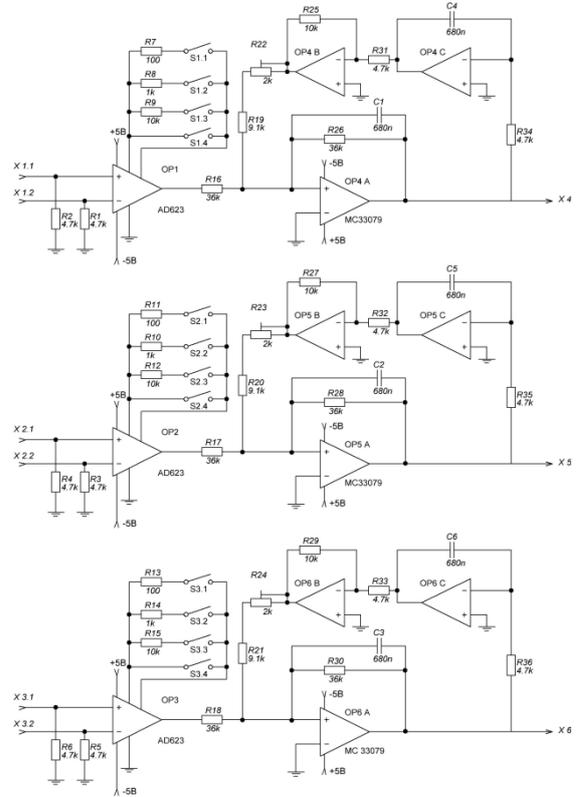


Рисунок 9 – Электрическая схема усилителя и фильтра

На рисунке 10 а, показаны формы сигнала на входе и выходе фильтра при помещении датчика внутрь соленоида, коэффициент усиления выбран равным 1.

При малой величине сигнала необходимо масштабировать его для точного измерения. На рисунке 10 б, видно, что при увеличении сигнала в 1000 раз, что уровень шумов очень большой, но на выходе фильтра получаем чистую синусоиду основной гармоники.

Обработка полученной первичной информации. Для определения параметров эллиптически поляризованного магнитного поля необходимо использование трех первичных преобразователей, расположенных в трех взаимноперпендикулярных плоскостях. Таким образом, сигнал каждого преобразователя будет проекцию магнитного поля на независимые координаты, так в декартовых координатах

МОНИТОРИНГ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ НА ОСНОВЕ ИИС БЛОЧНО-МОДУЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ

$$\begin{cases} H_x = A \sin(\omega t + \alpha), \\ H_y = B \sin(\omega t + \beta), \\ H_z = C \sin(\omega t + \gamma), \end{cases} \quad (1)$$

где A, B, C – амплитудные значения напряженности переменного поля по осям $x, y,$

z ; α, β, γ – начальные значения фаз колебаний вдоль тех же осей, ω – циклическая частота колебания напряженности магнитного поля, которая совпадает с частотой основной гармоники напряжения промышленной частоты $\omega=314 \text{ с}^{-1}$.

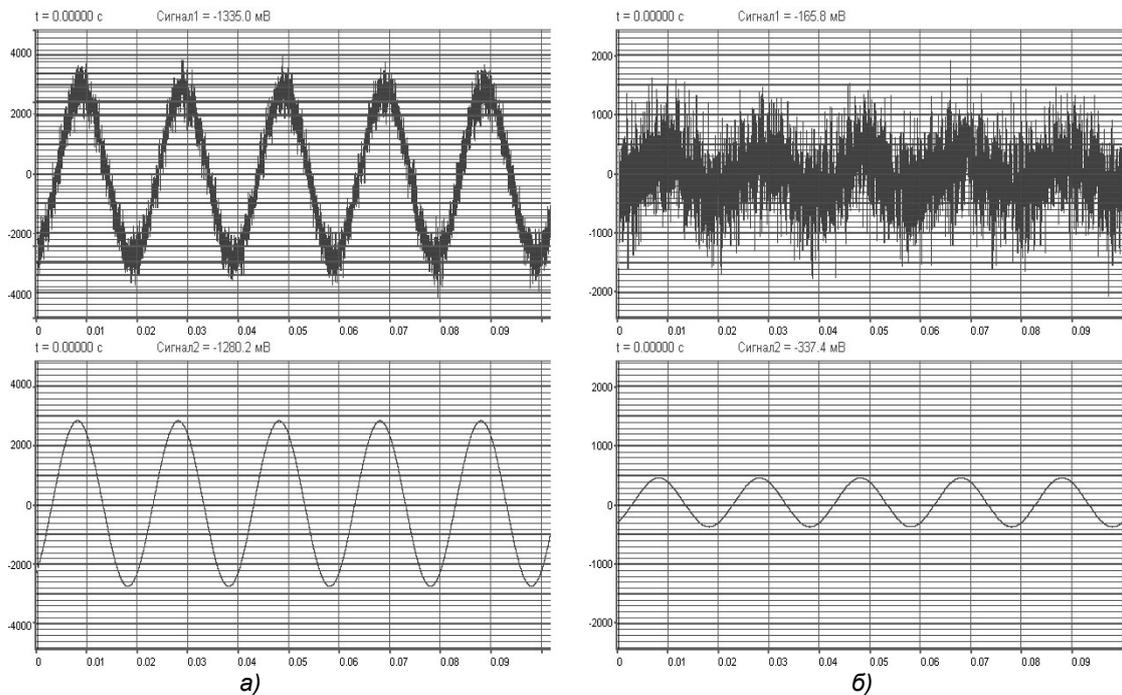


Рисунок 10 - Формы сигналов на входе (Сигнал 1) и выходе (Сигнал 2) фильтра, а) коэффициент усиления = 1, б) коэффициент усиления = 1000

В [9] показан переход от параметрической формы записи эллиптически поляризованного поля к канонической форме записи, и приведены расчетные формулы для определения параметров эллиптически поляризованных полей.

Таким образом, предлагаемая ИИС, имеющая блочно-модульную конструкцию выполняет как прямые, косвенные так и совокупные измерения; причем в последних двух случаях - на основе прямых измерений и соответствующей математической обработки. Разработанная ИИС включает следующие основные узлы:

1. Комплект измерительных преобразователей (датчики Холла) с усилителем и фильтром, которые воспринимают измеряемые физические величины и соединяют ИИС с исследуемым объектом;
2. Мультиплексоры, предназначенные для поочередного подключения измерительных преобразователей к системе или временного разделения каналов;

3. АЦП, осуществляющее преобразование всех измеряемых величин в единую физическую величину, с операциями масштабирования входных величин;

4. Программа, выполняющая собственно измерительные операции (сравнение с мерой, квантование, кодирование, входит в комплект поставки АЦП);

5. Программа математической и логической обработки измерительной информации для проведения косвенных или совокупных измерений;

6. Устройство хранения информации, состоящие из запоминающих устройств и преобразователей информации в виде удобном для дальнейшей переработки (**USB-флеш-накопитель**);

7. Выходное устройство, предназначенное для передачи информации человеку (дисплей).

Кроме того, ИИС позволяет, в зависимости от характера измерительных процессов, выбирать шаг квантования как по времени,

БЕЛИЦЫН И.В.

так и по уровню, а также опрашивать нужный канал.

Выводы

1. Проанализировано и выбрано схемное решение усилителя с фильтром на основе метода переменных состояний,

2. Произведенный расчет параметров схемы фильтра и его характеристик показал, что ослабление сигнала за полосой пропускания 40-60 Гц более 10db .

3. ИИС имеющая предложенную блочно-модульную конструкцию оптимально подходит для задач мониторинга ЭМП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белицын, И.В. Электрическое поле высоковольтных электрических установок, проблемы нормирования, расчета и моделирования / И.В. Белицын, Т.В. Котырло, А.В. Макаров / Ползуновский вестник 2006- № 4-2. -С. 387-393.

2. Белицын, И.В. Получение и анализ Экспериментальных данных электрического поля воздушной линии электропередачи // Ползуновский вестник 2010- № 4-2. С. 150-15.

3. Думанский, Ю.Д. Влияние электромагнитных полей радиочастот на человека/ Ю.Д. Думанский, А.М.Сердюк, И.П. Лось.- К.: Здоровья, 1975. - 159 с.

4. Polk C., Postow E. Handbook of Biological Effects of Electro- magnetic Fields.- Boca Raton, FL: CRC Press, 1996.

5. Liboff A.R., Smith S. D., McLeod B.R. Mechanistic Approaches to Interactions of Electric and Electromagnetic Fields with Living Systems.-New York: Plenum Press, 1987.- 109 p.

6. Методы практического конструирования при нормировании сигналов с датчиков: Пер. с англ. Горшков Б. Л. СПб.: ЗАО АВТЕКС, 2000. – 311 с.

7. Мошиц, Г. Проектирование активных фильтров: Пер. с англ./ Г. Мошиц, П. Хорн — М.: Мир, 1984. — 320 с., ил.

8. Хьюлсман, Л.П., Аллен Ф.Е. Введение в теорию и расчет активных фильтров: Пер. с англ./ Л.П. Хьюлсман, Ф.Е. Аллен/ М.: Радио и связь, 1984. - 384 с

9. Белицын, И.В. Эллиптическое электрическое и магнитное поля электроустановок. Метод их расчета и нормирования / И.В.Белицын, Т.В. Котырло, А.В. Макаров / Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 4. Энергетика.- С. 61-65.

Белицын И.В., к.п.н., доцент, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел.: 8(3852) 47-90-41, E-mail: biw@mail.ru